中间层顶重力波耗散引起钠原子输送的激光雷达观测研究

巴金[1,2]，胡雄[1]，闫召爱[1]，郭商勇[1]，程永强[1]
1 中科院国家空间科学中心，北京，100190
2 中国科学院大学，北京，100049

摘要 利用廊坊站(40.0 °N，116.3 °E)钠层测温测风激光雷达 2011 年至 2013 年共约 82h 的钠原子数密度和垂直风观测数据，首次分析了廊坊地区中间层顶区域大气重力波耗散引起的钠原子输送作用. 分析得到，90~100 km 重力波耗散引起的平均钠原子垂直通量整体为负，钠原子向下输送，在 93 km 处出现最大负值为-1.47×10^8 m^{-3} m/s，85~90 km 平均钠原子垂直通量为正，钠原子向上输送，但通量值随高度递减. 钠原子垂直通量方向在 90 km 处发生转变. 垂直通量随高度的变化造成钠原子汇聚，汇聚效应引起的平均钠原子产生率最大值在 91km 处达到了 1.4×10^8 m^{-3}/h，该值超过了相同高度上理论模拟的流星烧蚀注入引起的钠原子产生率峰值，说明它对钠层结构的形成具有重要的贡献. 分析结果与美国的观测结果相比，平均钠原子产生率峰值大小相近，但出现高度不同，说明大气重力波耗散引起的物质输送具有较大的地域变化特征. 研究结果可为大气物质输送理论的完善以及大气金属层物理模式的改进提供观测事实参考.

关键词 钠层测风测温激光雷达；大气重力波耗散；钠层结构；钠原子垂直通量；钠原子产生率
中图分类号 P351

1 引言

中间层顶区域是大气重力波活动和耗散非常显著的区域(Gardner et al.，2002；Zhao Y et al.，2003). 大气重力波引起大气粒子在局部平衡位置附近发生振荡，如果大气重力波发生耗散，振荡的大气粒子不能回到其平衡位置，从而产生对粒子的输送作用(Walterscheid and Hocking，1991；Walterscheid, 2001)；同时，如果粒子离开平衡位置后与其他物质发生化学反应，也会产生粒子输送作用(徐寄遥等，2001)，这种输送作用是大气波动与化学过程耦合引起的(Walterscheid and Schubert，1989). 大气物质的垂直输送是中间层顶大气结构和动力学研究的前沿课题. 目前，在全球大气层模式(如 WACCM)研究中，仅考虑湍流混合机制的物质垂直输送，没有考虑大气重力波耗散引起的垂直输送机制(Liu and Gardner，2004)，模

基金项目：国家自然科学基金（41104100），国家重点研发计划“天地联合多时空尺度近地空间环境监测”课题(2016YFB0501503)和高分专项青年创新基金资助（GFZX04060103）共同支持
作者简介：巴金，男，1989 年生，博士研究生在读，主要从事 MLT 重力波相关研究. 邮箱 ba-xt@126.com

式对中间层顶钠层的模拟结果与观测结果还有较大的差别(Plane，2003). 大气重力波耗散现象对大气各种物质成分垂直输送过程中的贡献，是一个知之不多的、待解决和参数化的科学问题.

钠层测风测温激光雷达提供了从观测手段上揭示大气重力波耗散引起物质垂直输送作用及其影响的方式. 该激光雷达可同时探测中间层顶区域(80~110 km)的大气三维风场、温度及钠原子数密度. 中间层顶钠原子因具有较长的寿命和相对稳定的状态可作为分析大气重力波耗散输送作用的示踪物(Bowman et al.，1969). Liu 和 Gardner(2004)首次利用钠层测风测温激光雷达在 SOR 站(35.0°N，106.5°W)的观测数据估算了大气重力波耗散对钠原子输送的显著效应，并与涡旋输送结果进行对比，结果显示两者对钠原子输送贡献相当. Liu 和 Gardner(2005)对 SOR 和 Maui 站(20.7°N，156.3°W)钠激光雷达观测数据进行对比研究，发现重力波耗散引起的输送作用随地理位置而变化. Gardner 和 Liu(2010)利用 SOR 的长期观测数据，得到了重力波引起的钠原子输送作用及多种输送速度的季节变化规律.

目前，虽然上述研究结果对中间层顶重力波-大气成分耦合过程的理解帮助很大，但离我们全面掌握大气重力波耗散输送作用、全球变化特性、参数化方案等还有很远的距离，需要更多台站的观测分析结果来支撑. 本文首次给出利用位于东半球的中科院廊坊临近空间环境野外科学观测研究站(40.0°N，116.3°E)钠层测风测温激光雷达观测数据分析大气重力波耗散引起的钠原子输送作用的结果，并与美国 SOR 与 Maui 的观测结果进行比较.

2 观测设备和数据来源

廊坊站钠层测风测温激光雷达是中国科学院国家空间科学中心自主研发的先进探测设备(Yan et al.，2009，Hu et al.，2011；徐丽等，2010)，其探测原理与美国的同类激光雷达(Bills et al.，1991；She and Yu，1994；Gardner and Yang，1998)相同. 该激光雷达发射三束激光，分别指向天顶方向、天顶偏东 20°、天顶偏北 20°，采用 3 个望远镜分别接收以上三个方向的大气回波信号，以同时探测 80~105 km 大气三维风场、温度和钠原子数密度. 系统参数见表 1.

该激光雷达自 2010 年底以来开始常规观测，其温度、风场和钠原子密度等观测数据已用于中间层顶温度结构(Hu et al.，2011)、准单色大气重力波活动特性(王博等，2016)、突发钠层观测分析(程永强等，2016)以及大气模型验证等研究工作. 本文选取 2010~2013 年共 82 h 的夜间垂直风场和钠原子数密度观测数据进行大气重力波耗散引起的钠原子垂直输送特

征统计分析，观测数据的时间分辨率 15 min，垂直分辨率 1 km，最长一天的观测时长 8 h，平均观测时长为 4.5 h.

表 1 钠荧光多普勒激光雷达系统参数

Table 1 System parameters of sodium fluorescence Doppler lidar

名称	数值
激光波长	589.158 nm
调制频率	±630 MHz
激光平均功率	~1 W
激光重复频率	30 Hz
激光脉冲长度	~7 ns
激光发散角	~1 mrad
望远镜口径	1 m

3 分析方法

为了从观测数据中统计得到大气重力波耗散引起的钠原子垂直输送，首先需要提取大气重力波引起的垂直风扰动、钠原子数密度扰动，然后用大气重力波扰动量统计各高度的上平均钠原子垂直通量、平均钠原子产生率及其不确定度. 下面介绍相关分析方法.

3.1 大气重力波扰动量提取

利用每晚观每个高度上的垂直风和钠原子数密度观测数据，组成时间序列，原始数据减去该时间序列的线性趋势，得到的残差值作为垂直风扰动值和钠原子数密度的扰动值. 由于所采用的观测数据垂直分辨率为 1 km、时间分辨率为 15 min，平均观测时间 4.5 h，所以垂直风和钠原子数密度扰动值包含了平均周期为 30 min~9 h 以内、垂直波长为 2 km 以上的大气重力波信息. 所有的数据首先经过三倍标准偏差法检验以剔除毛刺点. 图 1 为 2010 年 12 月 28 日大气重力波垂直风扰动提取的示例.

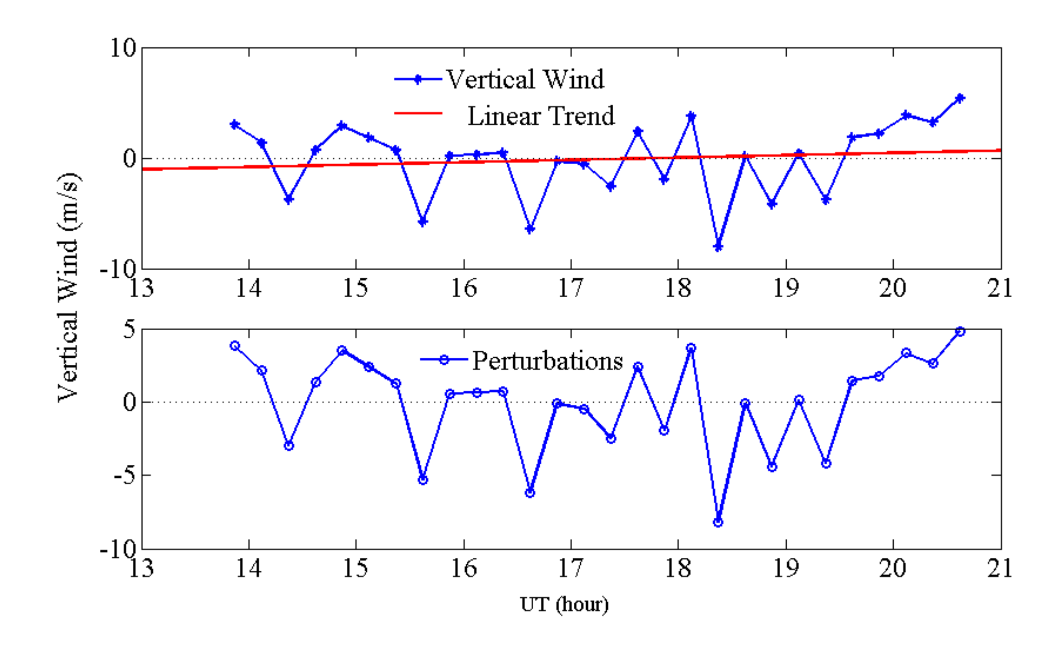


图 1 大气重力波扰动提取

Fig. 1 Extraction of atmospheric gravity wave perturbations

3.2 大气重力波扰动数据验证

为了验证提取的大气重力波扰动值的可靠性，需要检验扰动值的分布情况. 大气重力波活动可以认为是大气中的一个随机现象，其引起的地球物理量的变化具有随机分布特性. 由中心极限定理(Central Limit Theorem)可知，随机变量分布渐近于高斯分布，大量的随机变量积累分布会逐点收敛到高斯分布. 根据观测数据提取的垂直风和钠原子数密度扰动值是真实值和测量误差的和，测量误差的来源是光子噪声，虽然光子噪声属于泊松分布，但泊松分布在大量粒子数时趋向于正态分布，因此，激光雷达的大气重力波扰动值(含测量误差)符合高斯随机分布过程. 在实际大气中，当相互独立的波动的数量足够大的时候，垂直风扰动、钠原子数密度扰动及测量误差就应该符合均值为 0 的高斯随机分布模型.

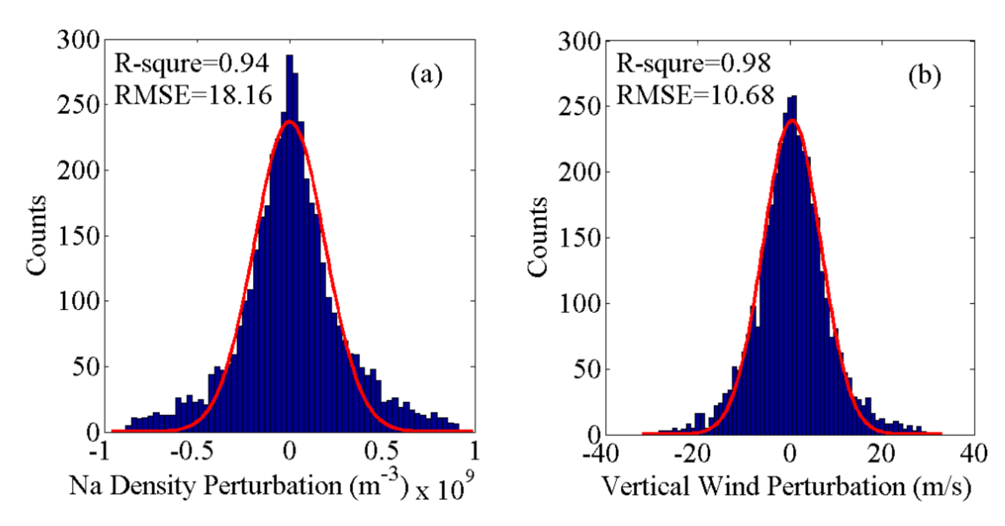


图 2 (a)钠原子数密度扰动分布及高斯拟合，(b)垂直风扰动分布及高斯拟合

Fig. 2 (a) Distribution of Na density perturbations and Gaussian fitting；(b) Distribution of vertical wind perturbations and Gaussian fitting.

对提取到的垂直风扰动和钠原子数密度扰动按照分布范围进行高斯拟合，如图 2 所示. 钠原子数密度扰动和垂直风扰动均属于正态分布，钠原子数密度扰动主要集中在±3×10^8 m^{-3}，垂直风扰动主要分布在±10m/s 的范围内. 从图 2 中的分布结构可知，垂直风扰动的高斯拟合结果比钠原子扰动的拟合结果较好，原因是大气波动是垂直风产生扰动的动力来源，而影响钠原子数密度变化的因素要比垂直风复杂的多，除受波动影响外，还会受到流星注入、光化学反应、中性化学反应等因素共同作用. 总体上说，二者的扰动值分布都较好的符合高斯分布模型，表明钠原子数密度和垂直风扰动数据是可靠的.

3.3 大气重力波耗散引起的钠原子垂直通量

理论上，钠原子的垂直通量是垂直风和钠原子数密度的乘积，如公式(1)，右边第一项 $\overline{w\rho_{Na}}$ 表示平均背景垂直风引起的钠原子垂直通量，第二项 $\overline{w'\rho_{Na}'}$ 表示大气波动引起的平均垂直通量， w' 和 ρ'_{Na} 分别表示垂直风扰动和钠原子数密度扰动. 大气重力波引起的平均垂直通量 $\overline{w'\rho_{Na}'}$ 是本文研究的对象. 值得注意的是非耗散重力波产生的 w' 和 ρ'_{Na} 其相位关系为正交， $\overline{w'\rho_{Na}'}$ 为零，所以非耗散重力波不会引起垂直通量；而当大气重力波发生耗散时， w' 和 ρ'_{Na} 原本正交的相位关系被改变， $\overline{w'\rho_{Na}'}$ 为非零，所以大气重力波耗散能够引起垂直通量.

上节中从观测数据中提取得到的大气重力波扰动包含测量误差，所以利用观测数据统计大气重力波引起的钠原子垂直通量如公式(2)所示，GF 表示重力波引起的钠原子垂直通量，Δw 和 $\Delta\rho_{Na}$ 表示垂直风和钠原子数密度的测量误差. 公式(3)是大气重力波引起的平均钠原子垂直通量. 每晚观测的大气重力波扰动和测量误差的平均值为 0，即 $\overline{w'}$、$\overline{\rho'_{Na}}$、$\overline{\Delta w}$ 和 $\overline{\Delta\rho_{Na}}$ 均为零，因此由公式(3)可知钠原子垂直通量统计结果不受激光雷达测量误差的影响.

对于激光雷达每一个晚上的连续观测数据，平均钠原子垂直通量的方差估计式如公式(4)所示，其中 τ 是观测时长，L=1 km 是垂直高度分辨率，Δz_{GF} =1km 为钠原子垂直通量相关高度，Δt_{GF} =15 min 为钠原子垂直通量相关时间(参量的取值及方差推导过程请详见 Gardner and Yang，1998)，观测到的垂直风扰动平方的平均值就表示为$\overline{(w_{ob}')^2} = \overline{(w')^2} + \overline{(\Delta w)^2}$.

根据每晚提取的垂直风及钠密度扰动数据，利用公式(3)可统计得到每晚各个高度上大气重力波引起的钠原子垂直通量. 根据每晚上的观测时间长度 τ，利用公式(4)可统计得到每晚各个高度上平均钠原子垂直通量的方差. 用公式(5)计算得到所有晚上各个高度上的平均钠原子垂直通量方差，对公式(5)的统计结果进行开方计算，得到平均钠原子垂直通量的标准差作为各个高度上平均钠原子垂直通量的不确定度参数.

$$\begin{aligned}\overline{w\cdot\rho_{Na}} &= \overline{(w+w')(\rho_{Na}+\rho_{Na}')} \\ &= \overline{w\rho_{Na}+w'\rho_{Na}'+\rho_{Na}w'+w'\rho_{Na}'} \\ &= \overline{w\rho_{Na}}+\overline{w'\rho_{Na}'}+\overline{\rho_{Na}w'}+\overline{w'\rho_{Na}'} \\ &= \overline{w\rho_{Na}}+\overline{w'\rho_{Na}'}\end{aligned} \tag{1}$$

$$GF = (w'+\Delta w)\cdot(\rho'_{Na}+\Delta\rho_{Na}) \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\overline{GF} &= \overline{(w'+\Delta w)\cdot(\rho'_{Na}+\Delta\rho_{Na})} \\ &= \overline{w'\rho'_{Na}+\rho'_{Na}\Delta w+w'\Delta\rho_{Na}+\Delta w\Delta\rho_{Na}} \\ &= \overline{w'\rho'_{Na}}+\overline{\rho'_{Na}\Delta w}+\overline{w'\Delta\rho_{Na}}+\overline{\Delta w\Delta\rho_{Na}} \\ &= \overline{w'\rho'_{Na}}\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}Var(\overline{GF}) &= \frac{1}{\tau L}\int_{-\tau/2}^{\tau/2}\int_{-L/2}^{L/2}[(w'+\Delta w)(\rho'_{Na}+\Delta\rho_{Na})-\overline{w'\rho'_{Na}}]^2 dtdz \\ &= \frac{\Delta z_{GF}}{L}\frac{\Delta t_{GF}}{\tau}\left[\overline{(w')^2}+\overline{(\Delta w)^2}\right]\left[\overline{(\rho'_{Na})^2}+\overline{(\Delta\rho_{Na})^2}\right]\end{aligned} \tag{4}$$

$$Var(\overline{GF})_{average} = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{N} Var(\overline{GF})_i \tag{5}$$

3.4 垂直通量引起的钠原子产生率

中间层顶区域大气重力波耗散会引起钠原子垂直通量随高度变化，钠原子垂直通量的梯度会导致不同高度的钠原子汇聚或者流失. 由重力波耗散引起的钠原子数密度增加或减小可以用本地钠原子产生率(Na Production Rate)来表示，如公式(6)，其中 P_{Na} 表示钠原子产生率，P_{Na} 为正表示本地钠原子受重力波耗散作用发生堆积，数密度增加；P_{Na} 为负即为流失率，表示本地钠原子流失，数密度减小(Gardner and Liu，2010). 公式(7)中 $Var(\overline{P_{Na}})$ 表示每晚各个高度上的平均原子产生率的方差，τ 是观测时长，L 是垂直高度范围，H 为标高，Δz_{GF} 为钠原子垂直通量相关高度，Δt_{GF} 为钠原子垂直通量相关时间.

$$P_{Na} = -\frac{\partial \overline{w'\rho'_{Na}}}{\partial z} \tag{6}$$

$$Var(\overline{P_{Na}}) = \left[1+2\left(\frac{H}{L}\right)^2\right]\frac{\Delta z_{GF}}{L}\frac{\Delta t_{GF}}{\tau}\frac{\left[\overline{(w')^2}+\overline{(\Delta w)^2}\right]\left[\overline{(\rho'_{Na})^2}+\overline{(\Delta\rho_{Na})^2}\right]}{H^2} \tag{7}$$

$$Var(\overline{P_{Na}})_{average} = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{N} Var(\overline{P_{Na}})_i \tag{8}$$

根据公式(3)得到每晚平均钠原子垂直通量的统计结果，利用公式(6)统计得到每晚各个高度上的平均钠原子产生率. 利用公式(7)可统计得到每晚各个高度上的平均钠原子产生率的方差. 利用公式(8)统计得到所有晚上各个高度上的平均钠原子产生率的方差，对公式(8)的统计结果进行开方计算，得到各个高度上平均钠原子产生率的标准差作为各个高度上平均钠原子产生率的不确定度参数.

3.5 测量误差的影响

钠激光雷达测量的垂直风速度和钠原子数密度数据都含有测量误差. 测量误差对估计值的影响大小与平均钠原子垂直通量和产生率的统计结果是否可靠十分相关. 从平均钠原

子垂直通量估计公式(3)和平均钠原子产生率估计公式(6)来看，测量误差不影响这些估计值. 所以利用上述方法估计的钠原子平均垂直通量和平均产生率是可靠的.

从公式(4)和(7)来看，每晚统计的平均钠原子垂直通量和钠原子产生率的方差不仅受测量误差 Δw 和 $\Delta\rho_{Na}$ 的影响，而且受大气重力波扰动 w' 和 ρ'_{Na} 发生地球物理学变化的影响 (Fritts，2000). 为减小二者的统计方差，使得平均垂直通量和平均产生率有确定的物理意义，我们采取增加观测数据时间尺度和空间尺度的办法. 本文我们采用了82h的时间尺度数据和垂直 1km 的空间尺度数据，给出有统计意义的结果.

4 结果和讨论

4.1 钠层结构

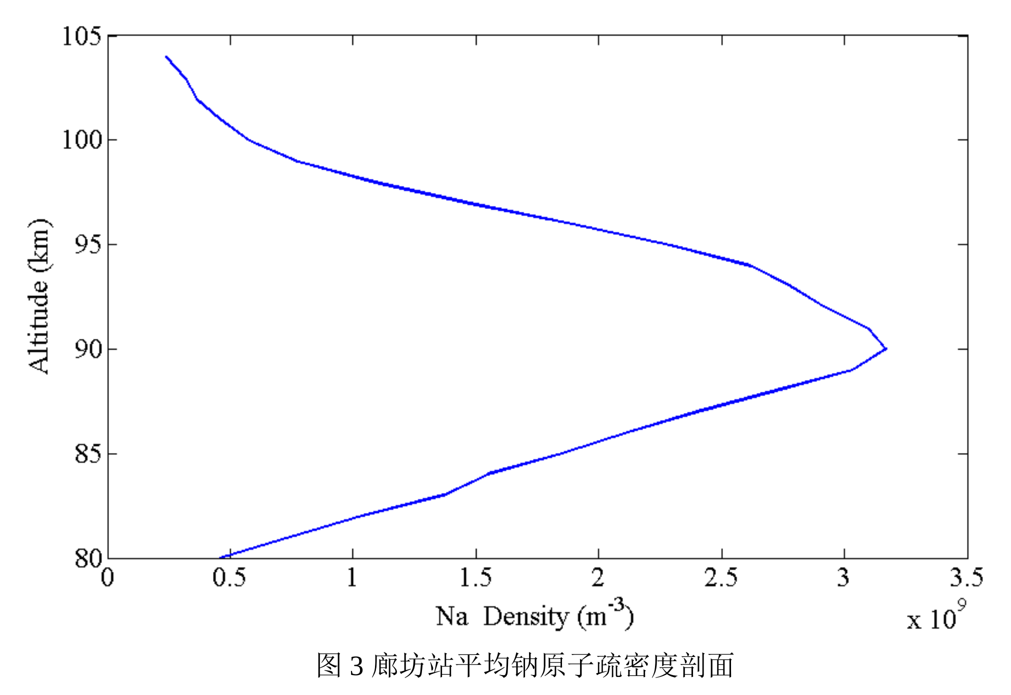


图 3 廊坊站平均钠原子疏密度剖面

Fig. 3 Mean Na atoms density profile at LangFang

将所有钠原子剖面数据平均得到廊坊上空的平均钠原子数密度剖面，如图 3. 廊坊地区平均钠原子数密度垂直剖面呈准高斯分布结构，钠层峰值高度为 90km，质心高度为 91km，平均数密度最大值为 $3.17\times10^{9}\ m^{-3}$. 中间层顶金属钠的来源是流星在大气中烧蚀，此外钠原子数密度变化还受电离层、光化学反应及大气波动因素的共同作用(Hedin and Gumbel，2011). 太阳辐射对中间层顶上部钠离子参与的光化学反应产生直接影响(Mcneil et al.，2002)；中间

层顶活性物质如 O_3、OH 的浓度变化影响钠原子和及其化合物所参与的中性化学反应(Plane and Helmer，1994)，对钠层中下部的钠原子和钠化合物影响明显；重力波、潮汐等大气波动和小尺度的涡旋对钠原子运动和输送提供了能量，造成钠原子垂直输送和混合(Fritts and Alexander, 2003). 这些因素相互联系，相互作用共同作用形成准高斯分布的钠层结构形态.

4.2 大气重力波耗散引起的钠原子垂直输送

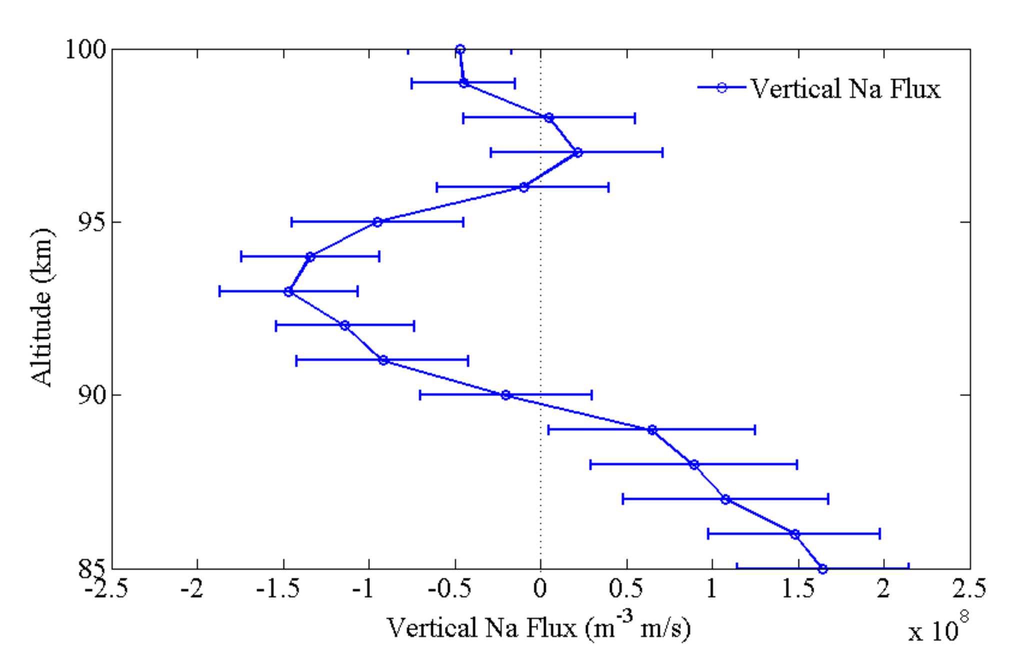


图 4 廊坊站平均钠原子垂直通量廓线及其标准差

Fig.4 Mean profile of vertical Na flux and its standard deviation at LangFang

图 4 给出了平均钠原子垂直通量廓线及其误差棒，廓线经过 5km 汉明窗进行平滑，廓线正值表示垂直向上运动，负值表示垂直向下运动，误差棒为不确定度，由平均钠原子垂直通量的标准差表示，误差棒的大小不影响钠通量最大值和最小值正负的判断. 图中明显看到钠通量在在 90 km 钠层峰值高度(见图 3)附近发生方向转变. 90 km 以下，钠通量为正(向上输送)；90 km 以上，钠通量为负(向下输送)，在 93 km 处达到最小值 $-1.47\times10^{8}\ m^{-3}\ m/s$；97 km 附近，钠通量接近于 0.

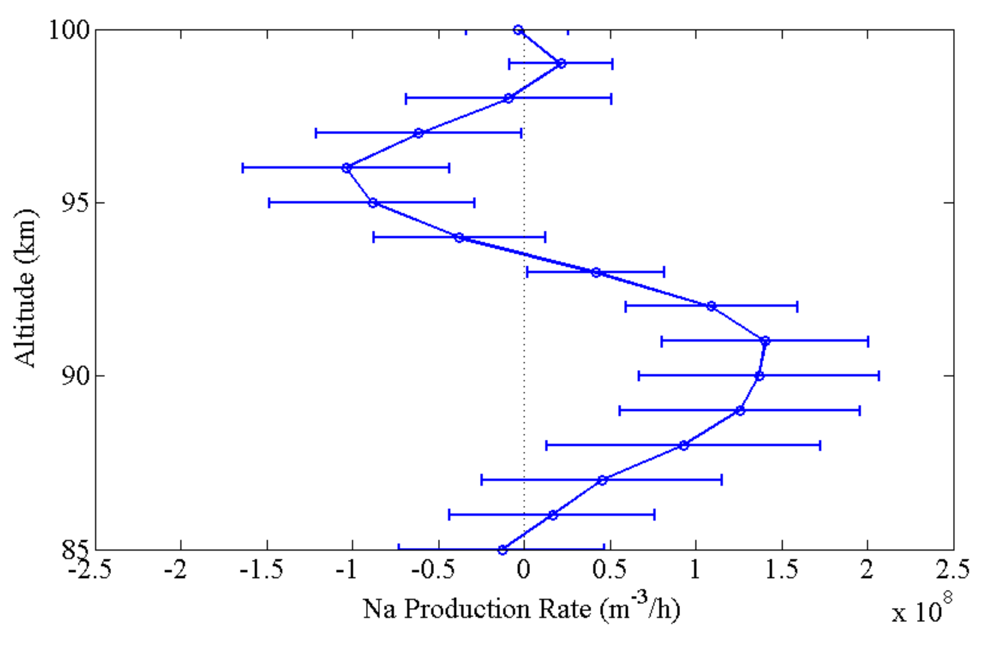


图 5 廊坊站钠原子产生率廓线及其误差

Fig. 6 Mean profile of Na production rate and its standard deviation at LangFang

图5给出了钠原子产生率剖面及其误差棒. 产生率廓线经过5 km汉明窗进行平滑. 误差棒为不确定度，由平均钠原子产生率标准差表示，误差棒的大小不影响产生率最大值和最小值正负的判断. 在 93.5 km 以下，钠原子产生率为正值，说明此高度范围内重力波耗散作用使得钠原子数目在单位时间内产生净增长，平均钠原子产生率最大值在 91 km 处达到了 1.47×10^{8} m^{-3}/h. 钠层的质心高度与钠原子产生率最大值高度一致，这可以说明大气重力波耗散输送作用使得钠原子在 91 km 质心高度附近产生堆积，大气重力波耗散引起的钠原子输送作用可能对钠层质心高度附近的峰值结构特征的形成起着重要的作用.

表 3 给出了廊坊站(40.0 °N，116.3 °E)与美国 SOR(35.0 °N，106.5 °W)和 Maui(20.7 °N，156.3 °W)观测站(Liu and Gardner，2005)的观测统计结果的比较. 表 3 显示三个地区钠原子垂直通量最小值和钠原子产生率最大值基本相当，但是其平均扩线趋势存在差异；SOR 地区和 Maui 地区在 85~100 km 的垂直钠通量基本为负，最大负值分别出现在 87 km 和 88 km 附近，钠原子产生率最大值在 86 km 附近；廊坊地区 85~90 km 钠通量为正向，最大负值出现在 93 km 附近，钠原子产生率最大值在 91 km 附近. 三个观测点统计结果存在不同的原因可能是由于地理位置等条件差异造成，目前全球对于钠原子垂直输送的观测还是较少，其中的差异问题还需更多数据分析来了解.

表 3 廊坊、SOR 和 Maui 三站钠原子垂直通量和钠原子产生率比较

Table 3 Comparison with vertical Na flux and Na production rate between Langfang, SOR and Maui stations

观测点	垂直通量最大负值及高度	产生率最大负值及高度
廊坊 (40.0 °N，116.3 °E)	-1.5×10^{8} m^{-3} m/s ~93 km	1.4×10^{8} m^{-3}/h ~91 km
SOR (35.0 °N，106.5 °W)	-2.6×10^{8} m^{-3} m/s ~87 km	2.8×10^{8} m^{-3}/h ~86 km
Maui (20.7 °N，156.3 °W)	-0.8×10^{8} m^{-3} m/s ~88 km	1×10^{8} m^{-3}/h ~86 km

4.3 讨论

一般认为钠层准高斯分布的结构主要受五部分因素影响，第一部分是流星烧蚀注入效应，由于钠层的高度与流星烧蚀高度相吻合，所以流星烧蚀产生的钠原子可直接注入 90 km 附近的钠层峰值(Plane，2004)；第二部分是离子化学过程，90 km 以上钠离子化学过程占主导地位，部分 Na 与 NO^+和 O_2^+发生一系列离子反应从而变为 Na^+，部分 Na 直接受太阳辐射电离成为 Na^+，Na^+数密度峰值在 100 km 附近(Mcneil et al.，2002)；第三部分是中性化学过程，85~90 km 以下中性化学反应占主导地位，Na 原子与 O_3、H_2，CO_2 发生系列反应变为状态稳定的 $NaHCO_3$，并向低层沉积(Plane，2003)，$NaHCO_3$ 数密度峰值在 85km 附近. 根据模式计算得到 Na^+和 $NaHCO_3$ 的数密度是 Na 原子数密度峰值 0.2~0.3 倍，离子化学和中性化学过程对钠层峰值的贡献有限(Plane，2004)；第四部分是涡旋输送过程，85~95 km 涡旋起均匀混合作用，混合作用造成钠原子向低层大气输送，对钠层准高斯及峰值结构的形成起负作用(Liu and Gardner，2004). 第五部分是大气重力波输送过程，大气重力波耗散引起的钠原子垂直通量会造成钠原子在垂直方向上产生堆积或流失，且在 92km 处重力波耗散引起的钠原子产生率与流星烧蚀注入引起的钠原子产生率二者相当(Gardner and Liu，2010)，由此可见大气重力波耗散引起的钠原子堆积效应与流星烧蚀产生的钠原子注入效应对钠层峰值结构形成具有重要的作用.

本文研究结果显示廊坊地区大气重力波耗散引起的输送作用造成钠原子在质心高度 91 km 附近汇聚. Plane(2004)利用 NAMOD 模式和 LDEF(Long Duration Exposure Facility)观测数

据，分析了流星在 MLT 区域的烧蚀高度、烧蚀效率及烧蚀产生的钠原子注入量，结果显示平均速度为 18 km/s 的流星在 92 km 烧蚀注入引起的钠原子产生率峰值为 $2.5\times10^{7}m^{-3}/h$. 廊坊站统计结果显示 91km 的峰值产生率达到了 $1.4\times10^{8}m^{-3}/h$，超过流星烧蚀注入引起的产生率峰值. 上述观测结果进一步说明大气重力波耗散对钠层的分布及峰值形成的贡献作用不可忽视，当前没有考虑这种输送机制的大气模型需要完善.

5 结论

本文首次采用中科院国家空间科学中心廊坊站钠层测温测风激光雷达的钠原子数密度和垂直风观测数据，分析了中间层顶重力波耗散引起的钠原子垂直输送作用及其对钠层结构的影响，廊坊地区大气重力波耗散引起的钠原子垂直通量在 90 km 以下为正，钠原子向上输送，90 km 以上为负，钠原子向下输送，93 km 处达到最大负值 -1.47×10^{8} m^{-3} m/s；91 km 钠层质心处的钠原子产生率达到最大值 1.47×10^{8} m^{-3}/h，大于理论计算的流星烧蚀注入引起的钠原子产生率峰值，说明大气重力波耗散引起的输送作用对整个钠层结构形成有重要影响. 廊坊的观测结果与美国 SOR 和 Maui 两地观测结果相比，基本一致，但是钠原子垂直通量方向转换高度和产生率峰值高度不同，说明了大气重力波耗散输送作用具有地域性特征.

致谢

感谢英国利兹大学 John Plane 教授对本文研究内容和结果提出了宝贵的意见.
感谢国家重点研发计划 “天地联合多时空尺度近地空间环境监测”课题(2016YFB0501503)的资助
感谢国家自然科学基金(41104100)和高分专项青年创新基金(GFZX04060103)的资助.

References

Bowman M R, Gibson A J, Sandford M C. 1969. Atmospheric Sodium measured by a Tuned Laser Radar. Nature, 221: 456-458, doi: 10.1038/221456a0.

Bills R E, Gardner C S, Franke S J. 1991. Na Doppler/temperature lidar: Initial mesopause region observations and comparison with the Urbana medium frequency radar. J. Geophys. Res., 962(D12): 22701–22707, doi: 10.1029/91JD02206.

Chen Y Q. 2016. Research and Observation of Relocatable Sodium Wind/Temperature Lidar (in Chinese) [Doctoral thesis]. Beijing, Nation Space Science Center, CAS.

Fritts D C. 2000. Errant inferences of gravity wave momentum and heat fluxes using airglow and Lidar instrumentation: corrections and cautions. J. Geophys. Res., 105(D17): 22355-22360, doi: 10.1029/2000JD900312.

Fritts D C, Alexander M J. 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. Rev. Geophys., 41(1):1-68, doi: 10.1029/2012RG000409.

Gardner C S, Yang W. 1998. Measurements of the dynamical cooling rate associated with the vertical transport of heat by dissipating gravity waves in the mesopause region at the Starfire Optical Range, New Mexico. J. Geophys. Res., 103(D14): 16909–16926, doi: 10.1029/98JD00683.

Gardner C S, Zhao Y, Liu A Z. 2002. Atmospheric stability and gravity wave dissipation in the mesopause region. J. Atmos. Terr. Phys., 64(8): 923-929, doi: 10.1016/S1364-6826(02)00047-0.

Gardner C S, Liu A Z. 2010. Wave-induced transport of atmospheric constituents and its effect on the mesospheric Na layer. J. Geophys. Res., 115(D20): 898-907, doi: 10.1029/2010JD014140.

Hedin J, Gumbel J. 2011. The global mesospheric sodium layer observed by Odin/OSIRIS in 2004-2009. J. Atmos. Terr. Phys., 73(73): 2221-2227, doi: 10.1016/j.jastp.2010.10.008.

Hu X, Yan Z A, Guo S Y, et al. 2011.Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region. Chinese Sci. Bull., 2011, 56(4): 417-423, doi: 10.1007/s11434-010-4306-x.

Kirkwood S, Collis P N. 1989. Gravity wave generation of simultaneous auroral sporadic-E layers and sudden neutral sodium layers. J. Atmos. Terr. Phys., 51(4): 259-269, doi: 10.1016/0021-9169(89)90077-9.

Liu A Z, Gardner C S. 2004. Vertical dynamical transport of mesospheric constituents by dissipating gravity waves. J. Atmos. Terr. Phys., 66(3-4):267-275, doi: 10.1016/j.jastp.2003.11.002.

Liu A Z, Gardner C S. 2005. Vertical heat and constituent transport in the mesopause region by dissipating gravity waves at Maui, Hawaii (20.7 °N), and Starfire Optical Range, New Mexico (35 °N). J. Geophys. Res., 110(D9): D09S13, doi: 10.1029/2004JD004965.

Mcneil W J, Murad E, Plane J M. 2002. Models of Meteoric Metals in the Atmosphere. Meteors in the Earth’s Atmosphere, Cambridge University Press, 265-289.

Plane J M, Helmer M. 1994. Laboratory studies of the chemistry of meteoric metals. Res. Chem. Kin., 26(6): 313-367, doi: 10.1016/B978-0-444-82024-2.50010-1.

Plane J M. 2003. Atmospheric chemistry of meteoric metals. Chem. Rev., 103(12): 4963-4984. doi: 10.1021/cr0205309.

Plane J M. 2004. A time-resolved model of the mesospheric Na layer: constraints on the meteor input function. Atmos. Chem. Physics, 4(3): 627-638, doi: 10.5194/acp-4-627-2004.

She C Y, Yu J R. 1994. Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region. Geophys. Res. Lett., 21: 1771-1774, doi: 10.1029/94GL01417.

Walterscheid R L, Schubert G. 1989. Gravity wave fluxes of O_3 and OH at the night side mesopause. Geophys. Res. Lett., 7(16): 719-722, doi: 10.1029/GL016i007p00719.

Walterscheid R L, Hocking W K. 1991. Stokes diffusion by atmospheric internal gravity waves. J. atmos. sci., 48(20): 2213-2230, doi: 1520-0469(1991)048<2213:SDBAIG>2.0.CO;2.

Walterscheid R L. 2001. Gravity wave transports and their effects on the large-scale circulation of the upper mesosphere and lower thermosphere. Adv. Space Res., 27(10): 1713-1721, doi: 10.1016/S0273-1177(01)00298-8.

Wang B. 2016. Observational study on the quasi-monochromatic inertia gravity waves in near space (in Chinese) [Doctoral thesis], Beijing, Nation Space Science Center, CAS.

Xu L, Hu X, Yan Z A. 2010. Simulation of echo-photon counts of a Sodium Doppler Lidar and retrievals of atmospheric parameters. Chin. J. Geogphys. (in Chinese), 53(7): 1520-1528, doi: 10.1002/cjg2.1522.

Yan Z A, Hu X, Guo S Y, et al. 2009. Long term laser frequency stabilization for application in sodium resonance fluorescence Doppler lidar. Proc. SPIE., 7382, doi: 10.1117/12.836539.

Zhao Y, Liu A Z, Gardner C S. 2003. Measurements of atmospheric stability in the mesopause region at Starfire Optical Range, New Mexico. J. Atmos. Terr. Phys., 65(2): 219-232, doi: 10.1016/S1364-6826(02)00288-2.

中文参考文献

程永强. 2016. 可重部署钠层测风测温激光雷达观测与研究[博士论文]. 北京，中国科学院国家空间科学中心.
王博. 2016. 临近空间大气准单色惯性重力波观测研究[博士论文]. 北京，中国科学院国家空间科学中心.
徐丽，胡雄，闫召爱等. 2010. 钠多普勒激光雷达回波光子数仿真及大气参数反演. 地球物理学报, 53(7): 1520-1528.
徐寄遥，马瑞平. Smith A K. 2001. 光化-动力耦合重力波模式及其应用—Ⅰ.模式的建立. 中国科学(A 辑), S1(31): 143-158.
徐寄遥，马瑞平. Smith A K. 2001. 光化-动力耦合重力波模式及其应用—Ⅱ.稳定传播的重力波对中层顶区化学成分分布的影响. 中国科学(A 辑), S1(31): 149-156.

Lidar observations of atmospheric gravity wave dissipation induced Na atoms transportations in the mesopause region at LangFang, China

BA Jin[1,2], HU Xiong[1], YAN Zhao-Ai[1], GUO ShangYong[1],CHEN Yong-Qiang[1]

1, National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

2, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract A total of about 82 h observation data derived from a sodium fluorescence Doppler lidar of National Space Science Center (NSSC) at LangFang station, Hebei province, were used to study the transport of Na atoms induced by gravity wave dissipation in mesopause region. The mean vertical Na flux was mostly negative between 90 km and 100 km and the maximum was -1.47×10^{8} m^{-3} m/s at 93 km, Na atoms were transported downward, the mean vertical Na flux was positive from 85 km to 90 km and Na atoms were transported upward. The mean Na production rate was positive from 85 km to 93.5 km and the maximum was 1.4×10^{8} m^{-3}/h at 91 km, from 93.5 km to 100 km, the mean Na production rate was mostly negative. Gravity wave dissipation make Na atoms gathered at near 91 km and make the mean Na production rate significantly increase between 88 km and 92 km. The mean Na production rate induced by gravity wave dissipation significantly exceeds the Na production rate induced by meteoric input at near 91 km. It indicates gravity wave dissipations have an important contribution to the formation of the Na layer structure. Compared with the SOR and Maui observations, magnitude of Na flux and Na production are comparable in three stations, but the mean profiles of Na flux and Na production rate in three stations are not quite the same, it indicates geographical factors make differences to atmospheric material transport in different places. These results can provide guidance to parameterization and evolution of atmospheric metal model in mesopause region.

Keywords: Sodium fluorescence Doppler lidar; Gravity wave Dissipation; Na layer structure; Na flux; Na production rate